



Непрерывный иттербиевый одномодовый лазер с мощностью излучения 1500 Вт

А.А. Колегов¹, А.А. Абакшин^{1,2}, А.В. Горбачев^{1,2},
Д.А. Фролов^{1,2}, А.В. Чумаченко^{1,2}

¹ ООО «Нордлэйз», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты разработки и создания одномодового оптоволоконного лазера с высоким качеством излучения и мощностью 1500 Вт. Показаны перспективы дальнейшего увеличения мощности без ухудшения качества излучения.

Ключевые слова: волоконные лазеры, мощные лазеры, иттербиевые лазеры, одномодовые лазеры

Статья получена: 04.04.2022

Статья принята: 20.04.2022

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одномодовые волоконные лазеры мощностью более 1 кВт стали очень востребованными во многих отраслях промышленности (металлообработка, аддитивные технологии, объединение излучения и др.). Во многом это стало возможным благодаря их преимуществам: компактность, высокий КПД и др. Одномодовые волоконные лазеры с качеством пучка $M^2 < 1,3$ мощностью более 500 Вт попадают под санкции и ввести их в Россию не представляется возможным, а производства таких лазеров в России нет. Поэтому разработка и производство отечественного одномодового волоконного лазера мощностью 1,5 кВт и более является актуальной задачей.

Настоящая работа посвящена разработке и созданию одномодового оптоволоконного лазера с высоким качеством излучения и мощностью 1500 Вт, который может использоваться как само-

1500 W Ytterbium-doped Single Mode CW Fiber Laser

A. A. Kolegov¹, A. A. Abakshin^{1,2}, A. V. Gorbachev^{1,2},
D. A. Frolov^{1,2}

¹ Nordlase, Saint Petersburg, Russian Federation

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation

This paper presents the results of the development and creation of a single mode fiber laser with high beam quality and a power of 1500 W. The prospects for further increasing the power without degradation the quality of the beam are shown.

Keyword: fiber lasers, high power lasers, ytterbium lasers, single mode lasers

Received on: 04.04.2022

Accepted on: 20.04.2022

INTRODUCTION

At present, the single-mode fiber lasers with a power of more than 1 kW have become very popular in many industries (metalworking, additive processes, radiation combining, etc.). In many respects, this became possible due to their advantages: small size, high efficiency, etc. The single-mode fiber lasers with a beam quality of $M^2 < 1.3$ and a power of more than 500 W are subject to the sanctions, thus it is not possible to import them into Russia. There are no production facilities for such lasers in Russia. Therefore, development and production of a domestic single-mode fiber laser with a power of 1.5 kW or more is a crucial task.

This paper is devoted to the development and implementation of a single-mode fiber laser with the high radiation quality and a power of 1500 W that can be used both independently and as a part of various laser stations and systems.

1. EXPERIMENTAL PROCEDURE

As it is known, an increase in the beam output power can lead to the nonlinear effects in the fiber, the

стоятельно, так и в составе различных лазерных комплексов и систем.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Как известно, с наращиванием выходной мощности излучения в волокне могут проявляться нелинейные эффекты, пороги возникновения которых зависят от длины волокна и диаметра сердцевины [1]. Лучшее сочетание диаметра сердцевины волокна и его числовой апертуры, обеспечивающее параметр $M^2 < 1,3$ (можно считать близким к дифракционному) и выходную мощность 2–3 кВт [2–4], это значения 20 мкм с числовой апертурой $NA=0,06$.

В основном на ограничение выходной мощности волоконного лазера оказывают влияние следующие факторы, проявление которых зависит от диаметра сердцевины и длины используемого волокна: совокупность термальных и нелинейных эффектов; оптический пробой; яркость диодов накачки; модовая нестабильность (ТМИ).

Сердцевина диаметром 20 мкм с числовой апертурой $NA=0,06$ дает лучшее сочетание, обеспечивающее параметр $M^2 < 1,3$ (можно считать близким к дифракционному), и выходную мощность 2–3 кВт. Пороговую мощность оптического пробоя для такого волокна можно оценить по формуле [1]:

$$P_{out}^{damage} = I_{damage} \pi a^2, \quad (1)$$

где a – радиус поля моды, I_{damage} – пороговая интенсивность. И при $I_{damage} \approx 13$ Вт/мкм² [5] пороговая мощность составит ≈ 4000 Вт. Таким образом, имеется возможность получить одномодовое излучение в полностью волоконной схеме мощностью до 4 кВт. Тем не менее исследований по определению пороговой интенсивности пробой кварца для непрерывного излучения не проводилось и этот вопрос остается открытым.

В случае распространения излучения с широким спектром среди нелинейных эффектов самый низкий порог возникновения будет иметь эффект вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Его пороговую мощность можно оценить [1] по формуле:

$$P_{out}^{SRS} = \frac{25\pi a^2}{g_R L}, \quad (2)$$

где L – длина оптического тракта, $g_r = 10^{-13}$ м/Вт [6].

В соответствии с формулой (2) построены графики пороговой мощности ВКР в зависимости от длины волокна для разных диаметров поля моды (рис. 1). Рисунок иллюстрирует тот факт, что

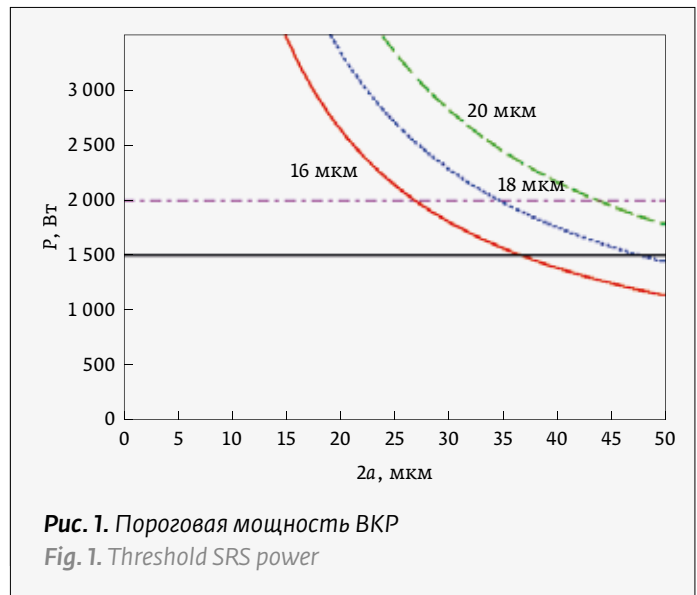


Рис. 1. Пороговая мощность ВКР

Fig. 1. Threshold SRS power

thresholds for which depend on the fiber length and the core diameter [1]. The best combination of the fiber core diameter and its numerical aperture that provides the parameter $M^2 < 1.3$ (to be considered close to diffractive one), and an output power of 2–3 kW [2–4] is 20 μm with a numerical aperture $NA=0.06$.

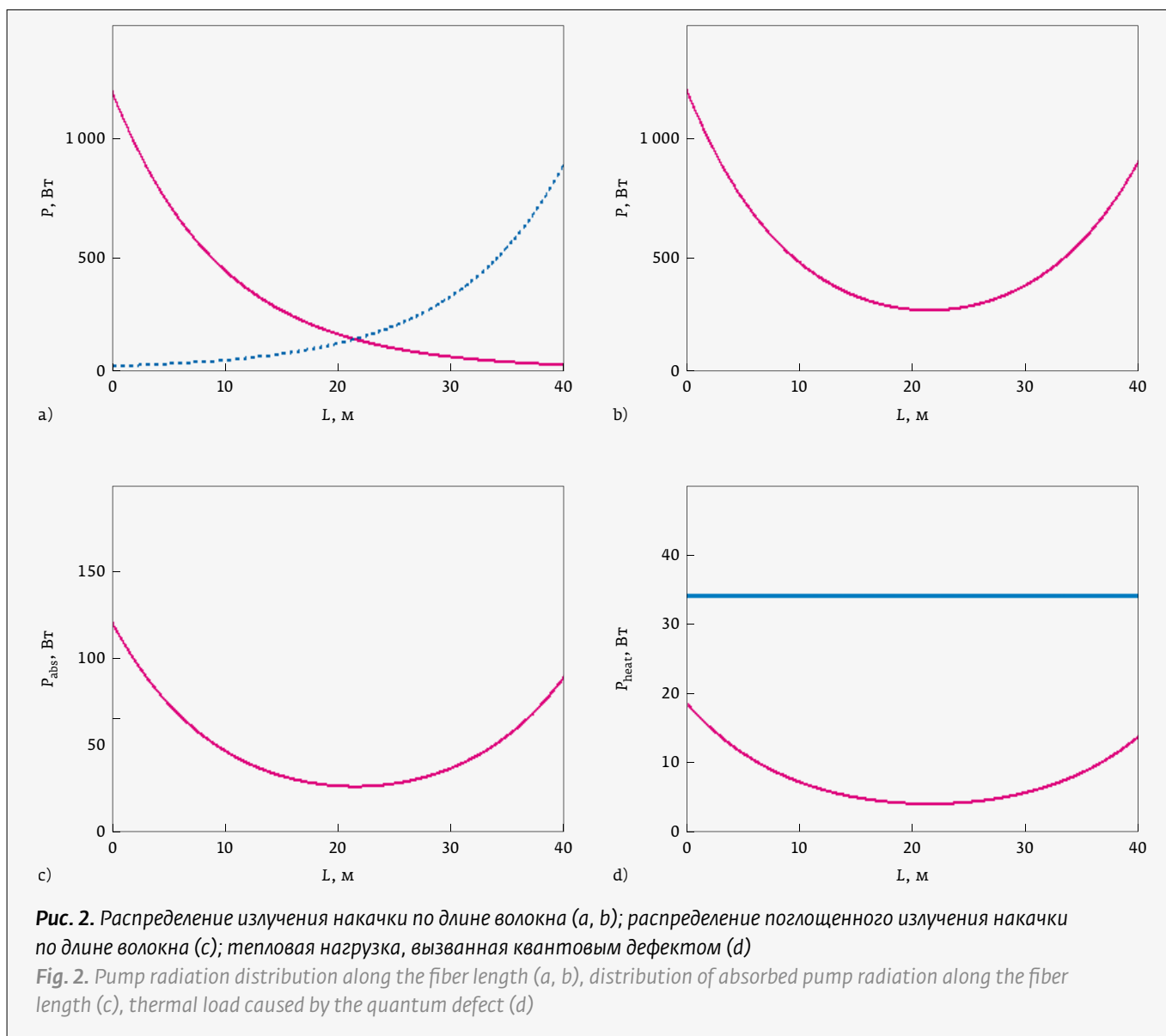
Basically, the following factors have an impact on the limitation of the fiber laser output power the manifestation of which depends on the core diameter and the length of the fiber used: a combination of thermal and nonlinear effects; optical breakdown; pump diode brightness; mode instability (TMI).

A core with a diameter of 20 μm and a numerical aperture of $NA=0.06$ leads to the best combination, providing the $M^2 < 1.3$ parameter (to be considered close to the diffractive one) and an output power of 2–3 kW. The threshold power of optical breakdown for such a fiber can be assessed using the following formula [1]:

$$P_{out}^{damage} = I_{damage} \pi a^2, \quad (1)$$

where a is the mode field radius, I_{damage} is the threshold intensity, and at $I_{damage} \approx 13$ $\text{W}/\mu\text{m}^2$ [5] the threshold power is ≈ 4000 W. Thus, it is possible to obtain single-mode radiation in an all-fiber circuit with a power of up to 4 kW. Nevertheless, the studies to determine the threshold intensity of the quartz breakdown for continuous radiation have not been performed, therefore the question remains open.

In the case of radiation propagation with a wide spectrum among the nonlinear effects, the stimulated



длина оптического тракта волокна с диаметром поля моды 18 мкм для достижения лазерной мощности 1500 Вт не должна превышать примерного значения в 47 м.

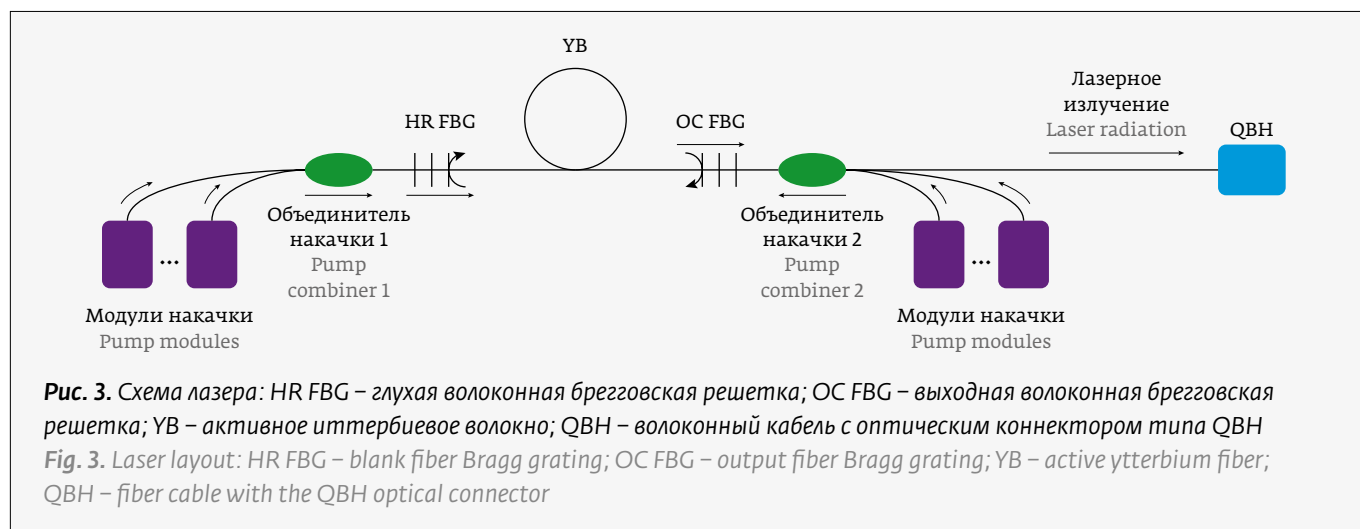
Модовая нестабильность проявляется в перекачке энергии из основной моды в высшие и может приводить к флуктуациям выходной мощности и ухудшению качества излучения, что связано с наведенными изменениями показателя преломления волокна. Как показали результаты исследования [7], модовая нестабильность возникает при средней тепловой нагрузке $Q=34$ Вт/м. Таким образом, необходимо обеспечить условия генерации лазерного излучения с меньшей тепловой нагрузкой. Здесь ключевыми факторами являются коэффициент поглощения и квантовый дефект.

Raman scattering (SRS) will have the lowest threshold of occurrence. Its threshold power can be assessed using the following formula [1]:

$$P_{out}^{SRS} = \frac{25\pi a^2}{g_R L}, \quad (2)$$

where L is the length of the optical path, $g_r=10^{-13}$ м/Вт [6].

In accordance with formula (2), Figure 1 shows the SRS threshold power charts depending on the fiber length for various mode field diameters. This figure illustrates the fact that the optical path length of a fiber with a mode field diameter of 18 μm shall not exceed approximately 47 m to achieve a laser power of 1500 W.



На рис. 2 представлено распределение излучения накачки по длине волокна, поглощенная часть излучения накачки и тепловая нагрузка, связанная с квантовым дефектом.

В соответствии с полученными результатами средняя тепловая нагрузка не превысила 9 Вт/м, что позволяет в дальнейшем увеличить мощность лазера до предельной величины тепловой нагрузки 32 Вт/м.

Схема лазера (рис. 3) проста и принципиально не отличается от известных мировых производителей [2-4]. Специально подобранные компоненты с минимальными потерями обеспечивают высокую эффективность и надежность лазера. Накачка активного волокна осуществляется с двух сторон лазерными диодными модулями в количестве 7 шт. с длиной волны 915 нм и максимальной выходной мощностью 370 Вт. Такой способ накачки распределяет тепловую нагрузку по волокну и существенно снижает нагрузку с мест сварок и оптоволоконных компонентов.

Резонатор лазера образован парой волоконных брегговских решеток производства AFR, поддерживающей излучение сигнала до 3 кВт и излучение накачки до 1,5 кВт. Активное иттербиевое волокно имеет диаметр сердцевины 19,5 мкм и числовую апертуру $NA=0,065$. Поглощение излучения в активном волокне на длине волны 915 нм составляет 0,39 дБ/м. Длина активного волокна в резонаторе составила 35 м. Излучение накачки в активное волокно вводится с помощью объединителей накачки Lightcomm типа $(6+1)\times 1$. Со стороны глухой решетки HR FBG вводится примерно 1200 Вт излучения накачки (использовано 4 диодных модуля), а со стороны выходной решетки OC FBG – примерно 900 Вт (использовано

Mode instability is evident in the energy transfer from the fundamental mode to the higher ones and can lead to fluctuations in the output power and radiation quality deterioration that is related to the induced changes in the fiber refractive index. The studies have shown [7] that the mode instability occurs at an average thermal load $Q=34$ W/m. Thus, it is necessary to provide the conditions for the laser beam generation with a lower thermal load. In this case, the key factors are the absorption coefficient and the quantum defect. Figure 2 shows the pump radiation distribution along the fiber, the absorbed part of the pump radiation, and the thermal load associated with the quantum defect.

In accordance with the results obtained, the average thermal load does not exceed 9 W/m that makes it possible to further increase the laser power to the threshold thermal load value of 32 W/m.

The laser layout (Fig. 3) is rather simple and does not fundamentally differ from those known in the world [2-4]. The specially selected components with minimal losses ensure high efficiency and reliability of the laser. The active fiber is pumped from both sides by 7 laser diode modules with a wavelength of 915 nm and a maximum output power of 370 W. This pumping method distributes the thermal load over the fiber and significantly reduces the load on the welding points and fiber optic components.

The laser cavity is formed by a pair of fiber Bragg gratings made by AFR, supporting the signal emission up to 3 kW and pump radiation up to 1.5 kW. The active ytterbium fiber has a core diameter of 19.5 μm and a numerical aperture $NA=0.065$. The radiation absorption in the active fiber at a wavelength of 915 nm is 0.39 dB/m. The active fiber length in the cavity is 35 m. The pump radiation is introduced into

3 диодных модуля). Вывод излучения обеспечивается кабелем длиной 7 м с оптическим разъемом типа QВН.

Особую роль в создании мощного волоконного лазера играет эффективный теплоотвод. Так для отвода тепла в разработанном лазере используются специальные водоохлаждаемые алюминиевые плиты. Для отвода тепла от активного волокна последнее размещается в V-канавках (рис. 4) и заливается специальным теплопроводящим компаундом для фиксации и обеспечения теплового контакта между волокном и теплопроводящей поверхностью.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 5 представлена зависимость выходной мощности лазерного излучения от мощности излучения накачки. Видно, что эффективность «свет в свет» составляет примерно 70%.

Спектр выходного излучения для разной мощности представлен на рис. 6. Из рис. 6 видно, что с увеличением мощности спектр уширяется. Ширина спектра на полувысоте для мощности 1500 Вт составляет примерно 3 нм, а для 500 Вт – примерно 1 нм, для 100 Вт – 0,6 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

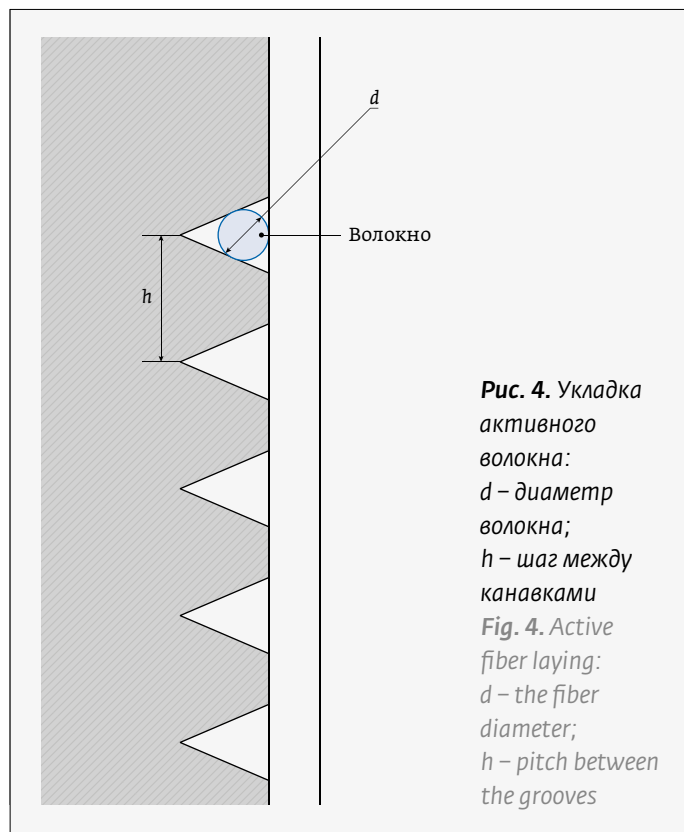
В ходе работы была создана высокоэффективная конструкция системы охлаждения, позволяющая эффективно отводить тепло от компонентов лазера, в свою очередь активное волокно укладывается в V-канавку с теплопроводящим материалом.

В результате работ достигнута мощность 1500 Вт с эффективностью «свет в свет» 70% и коэффициентом качества пучка не менее, чем $M^2 < 1,3$. Ширина спектра на максимальной мощности составила 3 нм.

Разработанная конструкция позволяет обеспечить мощность выходного излучения до 2 кВт добавлением модулей накачки с использованием той же компонентной базы. Применение специальных методик по фильтрации мод высшего порядка позволяет достичь мощности излучения до 4-5 кВт с M^2 не хуже 1,3 [8, 9], что является предметом следующей разработки.

REFERENCES

1. Dawson J. et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power. *Opt. Express*. 2008; 16:13240–13266. DOI: 10.1364/OE.16.013240.
2. Ikoma S. et al. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing. *Proc. SPIE*. 2017;1008: 100830Y. DOI: 10.1117/12.2250294.



the active fiber using the (6+1)×1 type Lightcomm pump combiners. Approximately 1200 W of pump radiation is introduced from the HR FBG blank grating side (4 diode modules are used), and approximately 900 W is introduced from the OC FBG output grating side (3 diode modules are used). The radiation coupling is provided by a 7 m cable with a QВН optical connector.

The efficient heat removal plays a special role in the implementation of a high-power fiber laser. Thus,

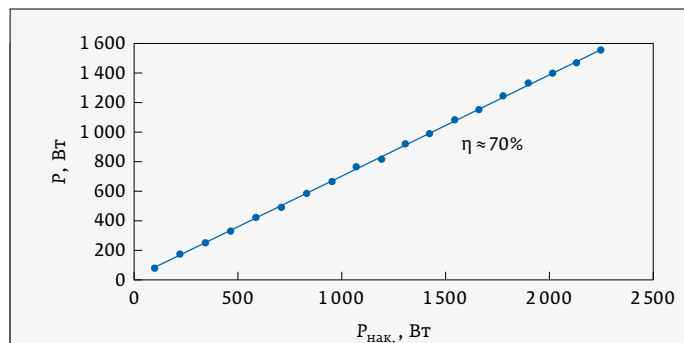
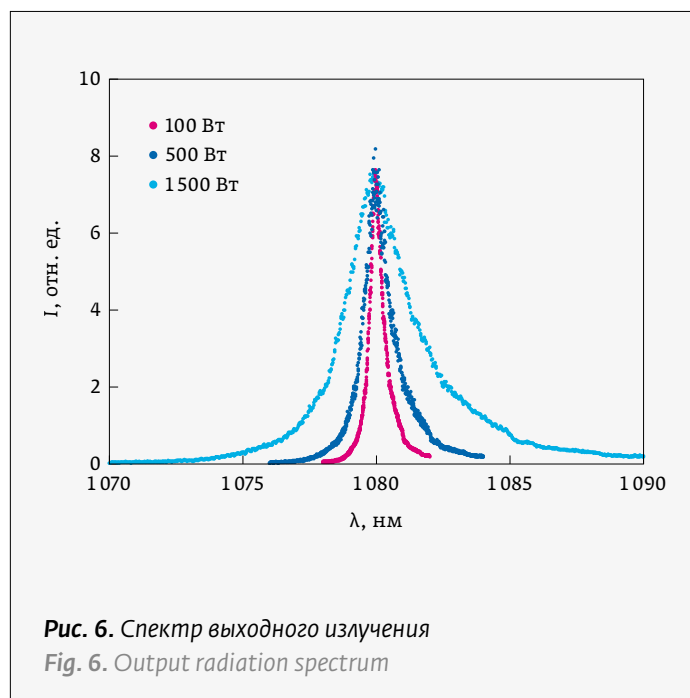


Рис. 5. Зависимость выходной мощности излучения от мощности излучения накачки

Fig. 5. Dependence of the output radiation power on the pump radiation power



- Zhang F., Zhang X. 2 kW single-mode fiber laser employing bidirectional-pump scheme. *Opto-Electronic Engineering*. 2017;44:953–956. DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.10.002.
- Mashiko Y. et al. 2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression. *Proc. of SPIE*. 2016; 9728:972805. DOI: 10.1117/12.2212049.
- Gapontsev V., Gapontsev D., Platonov N. et al. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction limited brightness. *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (Optical Society of America, 2005)* (Note: Used 14 μm MFD fiber implying 13W/μm² power handling capability without damage). DOI: 10.1109/CLEOE.2005.1568286.
- Smith A., Do B., Soderlund M. Deterministic nanosecond laser-induced breakdown thresholds in pure and Yb³⁺ doped fused silica. *Proc. SPIE*. 2007; 6453:645317 DOI: 10.1117/12.701399.
- Jauregui C., Otto H., Bretkopf S., Limpert J., Tünnermann A. Optimizing high-power Yb-doped fiber amplifier systems in the presence of transverse mode instabilities. *Opt. Express*. 2018; 24:7879–7892. DOI: 10.1364/OE.24.007879.
- Beier F. et al. Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier. *Optics Express*. 2017; 25:14892–14899. DOI: 10.1364/OE.25.014892.
- Shima K. et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing. *Proc. of SPIE*. 2018;10512:105120C. DOI: 10.1117/12.2287624.

АВТОРЫ

Колегов Алексей Анатольевич, к. т. н., главный конструктор по волоконным лазерам, ООО «Нордлэйз», a.kolegov@nordlase.ru, Санкт-Петербург, Россия.
 Абакшин Алексей Александрович, ведущий инженер-конструктор, ООО «Нордлэйз», a.abakshin@nordlase.ru, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
 Андрей Владимирович Чумаченко, ведущий инженер-конструктор, ООО «Нордлэйз», a.kolegov@nordlase.ru, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
 Горбачев Александр Викторович, начальник конструкторского отдела, ООО «Нордлэйз», a.gorbachev@nordlase.ru, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
 Фролов Дмитрий Александрович, ведущий инженер-технолог, ООО «Нордлэйз», d.frolov@nordlase.ru, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов

heat removal in the developed laser is performed by the special water-cooled aluminum plates. To remove heat from the active fiber, the latter is placed in the V-grooves, as shown in Fig. 4, and is filled with a special heat-removing compound for fixation and provision of thermal contact between the fiber and the heat-removing surface.

2. RESULTS OBTAINED AND THEIR ANALYSIS

Figure 5 shows the dependence of the laser radiation output power on the pump radiation power. It can be seen that the light-to-light efficiency is about 70%.

The output radiation spectrum for various powers is shown in Figure 6. It can be seen that the spectrum is broadened with increase in the power. The spectrum width at 50% for 1500 W is about 3 nm, for 500 W it is about 1 nm, for 100 W it is 0.6 nm.

CONCLUSION

In the course of works, a highly efficient design of the cooling system has been developed that makes it possible to effectively remove heat from the laser components. In turn, the active fiber is placed in a V-groove with a heat-conducting material.

As a result of the work, a power of 1500 W has been obtained with a light-to-light efficiency of 70% and a beam quality factor of at least $M^2 < 1.3$. The spectrum width at maximum power is 3 nm.

The developed design allows to provide an output radiation power of up to 2 kW by adding the pump modules using the same component base. The use of special filtration methods for the higher-order modes makes it possible to obtain a radiation power of up to 4–5 kW with M^2 no lower than 1.3 [8, 9] that is the subject of the next development.

ABOUT AUTHORS

Kolegov Alexey A., Cand. of Sciences (Technical), chief designer of fiber lasers, Nordlase, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: a.kolegov@nordlase.ru.
 Abakshin Alexey A., Leading design engineer, Nordlase, Saint Petersburg, Russian Federation, Leading design engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: a.abakshin@nordlase.ru.
 Gorbachev Alexandr V., Head of the design department, Nordlase, Saint Petersburg, Russian Federation, Head of the design department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: a.gorbachev@nordlase.ru.
 Frolov Dmitry A., Leading Process Engineer, Nordlase, Saint Petersburg, Russian Federation Leading Process Engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: d.frolov@nordlase.ru.
 Chumachenko Andrey V., Leading design engineer, Nordlase, Saint Petersburg, Russian Federation, Leading design engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of a conflict of interest